

УДК 551.2.3

## УЧЕТ ЗАКРИТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГЕОСРЕДЫ И ПРОБЛЕМА ДАЛЬНОДЕЙСТВУЮЩЕГО ВЛИЯНИЯ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

© 2016 Ю.Л. Ребецкий, А.С. Лермонтова

*Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, Москва; e-mail: reb@ifz.ru*

В рамках новой постановки рассмотрена проблема оценки дальнего действия влияния участков земной коры с аномальным режимом напряженного состояния. Новизна задачи основана на учете того факта, что в земной коре на разных ее горизонтах имеются обширные области закритического состояния. Рассмотрена двумерная задача плоского напряженного состояния для слоя в условиях вертикального сжатия с цилиндрической полостью под давлением. Считается, что слой без полости уже находится в упругопластическом состоянии. Показано, что снижение уровня аномальных напряжений, вызванных давлением в полости, может определяться законом  $r^{-0.5}$  ( $r$  — латеральное расстояние от центра полости, нормированное на размер включения), что существенно медленнее, чем в случае, когда начальное напряженное состояние упругое  $r^{-2}$ . Установлено, что закон затухания аномалии напряжений, вызванного полостью, зависит от геодинамического типа напряженного состояния.

*Ключевые слова:* напряжение, закритическое состояние, дальнее действие, очаг землетрясения, геодинамический режим.

### ВВЕДЕНИЕ

Существует принципиальная разница в решении задач механики в приложении к проблеме устойчивого деформированного состояния конструкций и горного массива. В первом случае появление участков конструкции, в которых возникают пластические деформации, означает, что достигнут предельный уровень нагружения и дальнейшее его увеличение может привести к разрушению целостности конструкции. Именно поэтому в большом числе прикладных пакетов по численному моделированию установлено ограничение на размер области закритического состояния.

Иная ситуация имеет место при решении задач механики в приложении к проблемам наук о Земле. Известно, что верхняя часть земной коры (5–15 км) в латеральном направлении делится на блоки и разъединяющие их разломные зоны (Садовский, Писаренко, 1985). Считается, что блоки деформируются упруго, а разломные зоны находятся в закритическом состоянии (Семинский и др., 2010; Cowie, Shipton, 1998; Pachell, Evans, 2002), то есть в них имеет место формирование необратимых

деформаций за счет смещений по разноранговым разрывам и трещинам мегаскопического масштаба (Ребецкий, 2003) — катакластическое течение (тектонофизика) или псевдопластическое (геомеханика). Ширина разломных зон зависит от их протяженности и может составлять от сотен метров до первых километров, а иногда и  $\geq 10$  км (Шерман и др., 1988).

В осадочных бассейнах практически повсеместно наблюдаются складчатые и разрывные деформации, что также говорит о достижении породами предела текучести (Хаин, Ломизе, 2005). В областях активного горообразования наблюдаются большие вертикальные перемещения горных масс при наличии высокоградиентных участков течения (Гзовский, 1975), что также возможно только в условиях закритического состояния пород. Средняя кора в тектонически активных районах достаточно часто представляет собой волновод, в котором наблюдается падение упругих модулей (скорости сейсмических волн). Существуют представления о том, что здесь за счет повышенной флюидизации должно иметь место накопление необратимых деформаций за счет макро- и мегаскопических трещин (Николаевский, 1979).

По В.Н. Николаевскому (1979) считается, что ниже границы М наблюдается истинно пластическое поведение пород, когда формирование необратимых деформаций осуществляется за счет движения дислокаций в кристаллах и зернах. То есть в земной коре области закритического состояния, определяющего способность пород накапливать необратимые деформации за счет трещинного или псевдопластического течения, могут захватывать весь их объем, а участки — блоки, находящиеся в упругом состоянии, расположенные в верхней части коры, следует рассматривать как определенное исключение. Нахождение громадных объемов пород в закритическом состоянии в то же время не приводит к потере несущей способности коры и литосферы в целом. В силу того, что закритическое состояние горных пород определяется не уровнем девиаторных напряжений (например, максимальных касательных), как это имеет место в металлах, а соотношением между девиаторными напряжениями и всесторонним давлением (закон Кулона-Мора), различные части коры остаются способными воспринимать дополнительную нагрузку. Подобное дополнительное нагружение приводит к перераспределению напряжений и появлению больших необратимых деформаций, сильно изменяющим рельеф земной поверхности и форму ее внутренних границ. Меняющаяся геометрия среды приводит к появлению дополнительного давления, компенсирующего локальное увеличение девиаторных напряжений. Участок коры или кора в целом приспособляются и способны эту дополнительную нагрузку воспринять.

Таким образом, важной особенностью задач механики в приложении к проблемам геодинамики и очага землетрясения является то, что среда, к которой прикладывается некоторая дополнительная нагрузка, уже находилась в закритическом состоянии. Следует отметить, что эту особенность задач геомеханики в настоящее время не учитывают. Так, известное решение задачи механики о распределении напряжений в окрестности включения в приложении к проблеме физики очага землетрясения (Добровольский, 1991; Dobrovolsky, 2000) получено в предположении идеально упругого поведения геосреды. Близкие подходы развиваются и в работах (Кузьмин, 1990; Кузьмин, Чуриков, 1998; Bernard, 1992; Hayakawa et al., 2004).

В последнее время широкое развитие получили численные методы, и так как существует понимание важности учета в таких расчетах закритического состояния геосреды, то появились примеры решения задач о распределении напряжений в окрестности структурных анома-

лий типа трещин или скважины под внутренним давлением в упругопластической постановке (Стефанов, 2010). Однако часто в этих решениях начальное состояние, которое существовало до возникновения (активизации) трещины или создания скважины, считается упругим. В этих решениях пластические зоны возникают в отдельных участках модели там, где соответствующие напряжения в процессе увеличивающегося уровня нагрузки достигли критических значений. Подобная постановка задачи механики отличается от сформулированной выше проблемы закритического поведения пород коры уже для начального напряженного состояния.

### УПРУГОЕ РЕШЕНИЕ ДЛЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ВКЛЮЧЕНИЯ

В настоящей работе представлены результаты решения задачи механики, полученного аналитическими методами, для бесконечного горизонтального плоского слоя с вертикальной цилиндрической полостью (ЦП), в которой создается внутреннее давление (рис. 1). Следует сказать, что прямо полученное решение может быть использовано для исследования образования коллекторов в окрестности пробуренной скважины. Но полученные результаты могут быть интерпретированы при обсуждении проблем активизации вулканов, а также очага готовящегося землетрясения. В этом случае имеет место двумерная задача механики, подобная той, что была рассмотрена в работах (Добровольский, 1991; Dobrovolsky, 2000). В данном случае важно, что рассматривается локальная область, внутри которой происходит увеличение механической энергии (рост давления на стенки полости), и исследуются деформационные проявления в окружающей среде. То есть фактически полученное решение можно использовать для объяснения дальнего действия влияния области локализации деформаций. Сам выбор задачи о вертикальной цилиндрической полости обусловлен простотой ее решения (одномерная задача механики), в которой в процессе увеличения нагрузки не происходит изменения ориентации главных осей напряжений, а изменяются только сами их величины.

Подобную задачу можно рассматривать как двумерную для изометричной области аномального напряженного состояния. Если давление в цилиндрической полости больше напряжений на бесконечном удалении от нее, то аномалия является жестким включением, а если меньше — то мягким (Добровольский, 1991).

Полагаем, что до создания цилиндрической полости в слое начальное напряженное состояние

однородное и связано с весом вышележащих пород  $p_{lt}$ :

$$\sigma_{rr}^0 = \sigma_{\theta\theta}^0 = -qp_{lt}, \quad \sigma_{zz}^0 = -p_{lt}. \quad (1)$$

Здесь  $q > 0$  — коэффициент бокового отпора (напряжения сжатия отрицательные). Заметим, что в такой постановке не учитывается вертикальная неоднородность напряжений в слое, обусловленная массовыми силами самого слоя.

Предварим решение упругопластической задачи для напряжений в окрестности цилиндрической полости результатами решения этой же задачи, но для идеально упругого поведения среды. Рассматриваемая задача отвечает плоскому осесимметрическому напряженному состоянию ( $\sigma_{z\theta} = \sigma_{z\theta}^0 = 0$ ,  $\sigma_{rz} = \sigma_{rz}^0 = 0$ ,

$\sigma_{zz} = \sigma_{zz}^0 = const$ ) и имеет следующее решение

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= -qp_{lt} - (p_0 - qp_{lt}) (R/r)^2, \\ \sigma_{\theta\theta} &= -qp_{lt} + (p_0 - qp_{lt}) (R/r)^2, \quad \sigma_{zz} = -p_{lt}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $p_0$  — давление на стенку полости.

Из решения (2) видно, что латеральные напряжения на большом удалении от полости стремятся к значениям начального напряженного состояния (1).

Заметим, что рассматриваемая для слоя задача является двумерной, но не плоского деформированного состояния (бесконечно длинная вертикальная полость), а плоского напряженного состояния (см. рис. 1): слой полостью имеет конечную мощность, к нему вдоль горизонтальных его границ приложены вертикальные сжимающие напряжения, равные весу вышележащих пород ( $\sigma_{zz} = -p_{lt}$ ), и вдоль этих границ действуют нулевые касательные напряжения (проскальзывание без трения). Считается, что по глубине слоя напряжения не изменяются (это позволяет получить решение в достаточно простой форме). Нами будут исследоваться напряжения на расстояниях от полости, многократно превышающие мощность слоя, что означает точечное приближение аномального включения, когда его форма не сказывается на виде решения.

## УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ

Для задачи в упругопластической постановке полагаем, что слой уже в начальной стадии находился за пределом упругости, т.е. для напряжений в (1) должно выполняться условие

$$\tau^0 = \tau_c + k_c p^0 \quad (3)$$

$$\text{при } p^0 = \frac{1+2q}{3} p_{lt}, \quad \tau^0 = \frac{|1-q|}{2} p_{lt}.$$

Здесь  $\tau^0$  и  $p^0$  — максимальное касательное напряжение и изотропное давление соответственно, а  $\tau_c$  и  $k_c$  — параметры текучести среды (предел прочности и коэффициент трения). В выполненных далее расчетах полагалось  $\tau_c = 2.5$  МПа,  $p_{lt} = 27$  МПа (то есть слой находится на глубине  $\sim 1$  км).

Рассматриваются два типа начального напряженного состояния слоя:

— горизонтальное сжатие  $\sigma_1^0 = \sigma_{zz}^0$ ,

$$\sigma_2^0 = \sigma_3^0 = \sigma_{rr}^0 = \sigma_{\theta\theta}^0; \quad (4)$$

— горизонтальное растяжение  $\sigma_3^0 = \sigma_{zz}^0$ ,

$$\sigma_2^0 = \sigma_1^0 = \sigma_{rr}^0 = \sigma_{\theta\theta}^0. \quad (5)$$

Здесь  $\sigma_i^0$  ( $i = 1, 2, 3$ ) — главные напряжения, а верхний индекс определяет, что данные компоненты тензора напряжений отвечают начальной стадии. В рамках приложения рассматриваемой задачи механики к проблемам геодинамики все нормальные напряжения являются сжимающими ( $\sigma_i^0$ ).

Первое из этих напряженных состояний (4) отвечает геодинамическому режиму горизонтального сжатия при значении коэффициента Лодэ-Надаи  $\mu_\sigma = -1$  (вид тензора — одноосное растяжение) и коэффициенте бокового отпора  $q > 1$ , а второе (5) — режиму горизонтального растяжения при  $\mu_\sigma = 1$  (вид тензора — одноосное сжатие) и коэффициенте бокового отпора  $q < 1$ .

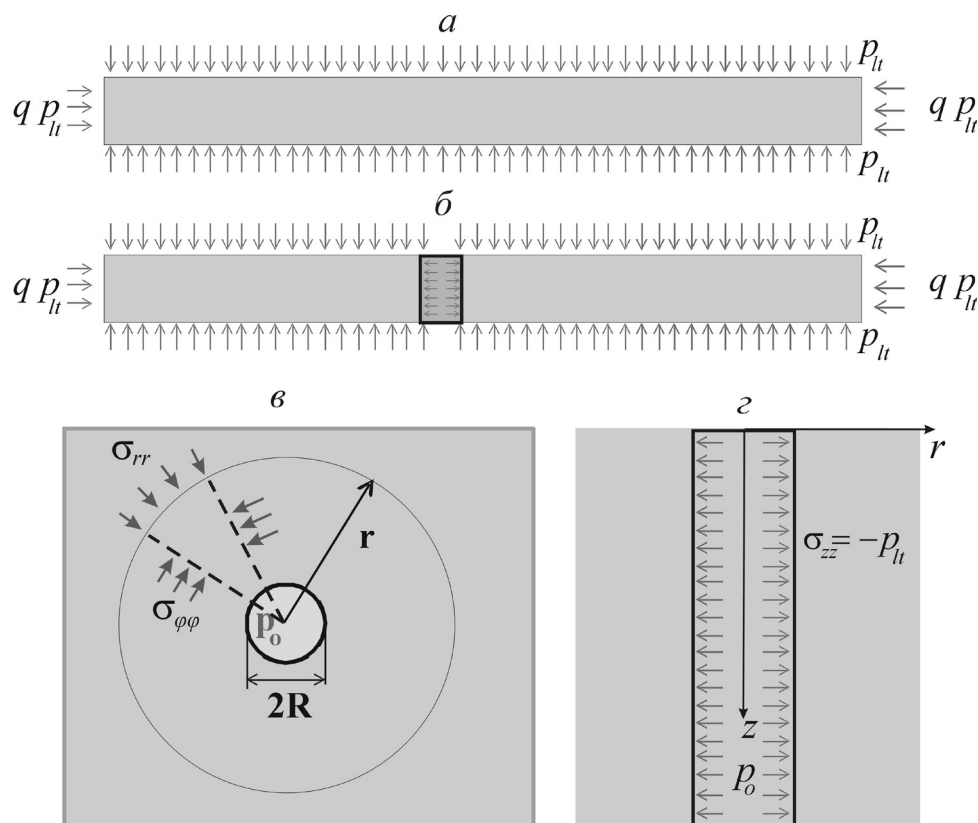
Отметим, что в случае закритического состояния  $q$  не произвольно, и вид соотношения для него зависит от того, как в системе координат, связанной с ориентацией скважины, ориентированы оси главных напряжений. Используя (3) для типа геодинамического режима горизонтального растяжения ( $\sigma_1^0 = \sigma_{\phi\phi}^0 = \sigma_{rr}^0 > \sigma_{zz}^0 = \sigma_3^0$ ), находим:

$$q = -\frac{3\tau_c / p_{lt} - (1.5 - k_c)}{1.5 + k_c}. \quad (6)$$

Заметим, что для  $q$  должно выполняться условие:

$$\frac{\nu}{1-\nu} < q < 1, \quad (7)$$

где  $\nu$  — упругий коэффициент Пуассона. Левое ограничение в неравенстве (7) вытекает из того, что в массиве под действием собственного веса



**Рис. 1.** Схема задачи о напряженном состоянии плоского слоя в глубине массива. Положение рассматриваемого слоя внутри массива в начальном напряженном состоянии (а); слой с вертикальной цилиндрической полостью, на стенках которой задано постоянное давление  $p_0$  (б); вид слоя с полостью в плане (в); вид слоя с полостью в разрезе с системой координат (г).

на упругопластической стадии будет большее латеральное сжатие (Ребецкий, 2008а, 2008б), чем для чисто упругого решения (Динник, 1926). Правое ограничение — это требование, чтобы в массиве имел место режим горизонтального растяжения (наибольшее сжатие вертикально). Если положить  $\nu = 0.25$  и использовать выше принятые значения для  $\tau_c$  и  $p_{lt}$ , то из (7) следует, что  $0 < k_c < 0.542$ . Такое ограничение на значение коэффициента трения означает, что если  $k_c > 0.542$ , то в слое на выбранной глубине не будет преодолен предел упругости и он останется в упругом состоянии. В случае больших глубин расположения слоя  $\tau_c / p_{lt} \rightarrow 0$  и правое ограничение для коэффициента трения стремится к 0.75.

Считаем, что напряжения, отвечающие режиму горизонтального сжатия, также соответствуют закритическому состоянию. Используя (3) для этого типа геодинамического режима ( $\sigma_{zz}^0 > \sigma_{\theta\theta}^0 = \sigma_{rr}^0$ ), находим:

$$q = \frac{3\tau_c / p_{lt} + (1.5 + k_c)}{1.5 - 2k_c}. \quad (8)$$

Так же как и в случае (4), для (5) должно выполняться условие:

$$q > 1, \quad (9)$$

т.е. иметь место режим горизонтального сжатия. Из (9) следует, что  $0.75 > k_c > 0$  при любых значениях  $\tau_c$  и  $p_{lt}$ . Если  $k_c > 0.75$ , то в слое не будет преодолен предел упругости и он останется в упругом состоянии.

Будем далее во всех случаях начального напряженного состояния (1) для задачи с цилиндрической полостью считать, что  $k_c = 0.5$ .

Создание на поверхности полости давления, отличающегося от начальных латеральных напряжений ( $\sigma_{rr}^0 = \sigma_{\theta\theta}^0 = -qp_{lt}$ ), изменяет состояние слоя, но он по-прежнему везде находится за пределом текучести. Согласно схеме обеих стадий нагружения (рис. 1) рассматриваемая модель также соответствует задаче плоского осесимметричного напряженного состояния. Для такого состояния главные оси напряжений ориентированы в радиальном и тангенциальном направлениях. Приведем окончательное решение рассматриваемой задачи:

$$\sigma_{rr} = -qp_{lt} - \delta p \left( \frac{R}{r} \right)^D, \quad \sigma_{\theta\theta} = -qp_{lt} - B\delta p \left( \frac{R}{r} \right)^D \quad (10)$$

при  $\delta p = p_0 - qp_{lt}$ ,

где коэффициенты В, D зависят не только от типа напряженного состояния для начальной стадии

(4), (5), но и от уровня давления  $p_0$ , создаваемого в ЦП ( $R$  — радиус полости), по отношению к латеральному давлению в начальном состоянии  $qp_{lt}$  ( $p_0 < qp_{lt}$  — мягкое,  $p_0 > qp_{lt}$  — жесткое включение). В решении (10) отметим, что  $\delta p$  — величина изменения давления в полости. Из выражения (10) следует, что на большом удалении и радиальное, и тангенциальное напряжения стремятся к значению отношения  $-qp_{lt}$  при  $D > 0$  (см. далее).

Отметим разницу в построении упругого решения (2) и упругопластического решения (10). В первом случае используются уравнение сохранения импульса (уравнения равновесия) в радиальном направлении, закон Гука и соотношения Коши. Во втором — уравнение сохранения импульса и предельное соотношение Кулон — Мора (3).

Анализ решения (10) показывает, что возможно шесть вариантов соотношений между радиальным, тангенциальным и вертикальными напряжениями, формирующимися при изменении внутреннего давления в полости ( $|\delta p| > 0$ ):

- 1)  $\sigma_{\theta\theta} > \sigma_{rr} > \sigma_{zz}$  (горизонтальное растяжение — жесткое включение),
  - 2)  $\sigma_{rr} > \sigma_{\theta\theta} > \sigma_{zz}$  (горизонтальное растяжение — мягкое включение),
  - 3)  $\sigma_{rr} > \sigma_{zz} > \sigma_{\theta\theta}$  (горизонтальный сдвиг — мягкое включение),
  - 4)  $\sigma_{\theta\theta} > \sigma_{zz} > \sigma_{rr}$  (горизонтальное сдвиг — жесткое включение),
  - 5)  $\sigma_{zz} > \sigma_{rr} > \sigma_{\theta\theta}$  (горизонтальное сжатие — мягкое включение),
  - 6)  $\sigma_{zz} > \sigma_{\theta\theta} > \sigma_{rr}$  (горизонтальное сжатие — жесткое включение).
- Каждый вариант характеризуется геодинимическим типом напряженного состояния и соотношением между давлением в цилиндрическом включении и значениями горизонтальных напряжений на бесконечности (мягкое или жесткое включение).

Для всех рассмотренных случаев на большом удалении от полости напряженное состояние стремится к начальному (1). Поскольку в качестве начального напряженного состояния в нашей статье рассматривалось либо горизонтальное растяжение ( $\sigma_{rr}^0 = \sigma_{\theta\theta}^0 > \sigma_{zz}^0$ ), либо горизонтальное сжатие ( $\sigma_{zz}^0 > \sigma_{rr}^0 = \sigma_{\theta\theta}^0$ ), то напряженное состояние сдвига, возникающее на стадии создания полости с давлением на стенках, может существовать только на некотором ограниченном расстоянии от полости, переходя на удалении либо в состояние горизонтального сжатия, либо растяжения. Соответственно для этих случаев

(третий и четвертый) существуют ограничения на возможную величину коэффициента трения (см. (7) и (9)), удовлетворяющего уровню литостатического давления ( $p_{lt}$ ) на выбранной глубине слоя и прочности сцепления ( $\tau_c$ ).

Приведем выражения для безразмерных коэффициентов  $B$  и  $D$  для каждого рассмотренного варианта соотношений между радиальным, тангенциальным и вертикальным напряжениями, а также соотношения между нагружающими параметрами ( $p_{lt}$ ,  $p_0$ ), удовлетворяющие этим режимам напряженных состояний вблизи цилиндрической полости и выбранным параметрам прочности среды ( $\tau_c$ ,  $k_c$ ):

$$1) B = \frac{k_c}{1.5 + k_c} = 0.25, D = \frac{1.5 + 2k_c}{1.5 + k_c} = 1.25 \quad (11)$$

$$2) B = \frac{1.5 + k_c}{k_c} = 4, D = \frac{1.5 + 2k_c}{k_c} = 5, \quad (12)$$

$$3) B = -\frac{1.5 + k_c}{1.5 - k_c} = -2, D = -\frac{2k_c}{1.5 - k_c} = -1, \quad (13)$$

$$4) B = -\frac{1.5 - k_c}{1.5 + k_c} = -0.5, D = \frac{2k_c}{1.5 + k_c} = 0.5, \quad (14)$$

$$5) B = -\frac{k_c}{1.5 - k_c} = -0.5, D = \frac{1.5 - 2k_c}{1.5 - k_c} = 0.5, \quad (15)$$

$$6) B = -\frac{1.5 - k_c}{k_c} = -2, D = \frac{-1.5 + 2k_c}{k_c} = -1. \quad (16)$$

Обратим внимание здесь на (13) и (15). Для нашей постановки задачи при принятых параметрах прочности и литостатического давления знаменатель в выражениях для  $D$  всегда положительный, так как только при  $k_c < 0.75$  для начальных напряженных состояний имеет место достижение предела упругости и возникновение в лосе пластических деформаций.

Из расчета коэффициентов видно, что третий (13) и шестой (16) типы напряженных состояний имеют значение  $D < 0$ , что определяет *возрастание напряжений по мере удаления от полости*. На рис. 2 не показано распределение напряженных состояний в случаях третьего и шестого вариантов. Для них должен наблюдаться линейный рост напряжений по мере удаления от ЦП. При этом третий вариант напряженного состояния ( $\sigma_{rr} > \sigma_{zz} > \sigma_{\theta\theta}$ ) развивается на некотором удалении от полости, в то время как вблизи нее имеет место  $\sigma_{rr} > \sigma_{\theta\theta} > \sigma_{zz}$ , а на больших расстояниях  $\sigma_{zz} > \sigma_{rr} > \sigma_{\theta\theta}$ . В свою очередь шестой вариант напряженного состояния ( $\sigma_{zz} > \sigma_{\theta\theta} > \sigma_{rr}$ ) разви-

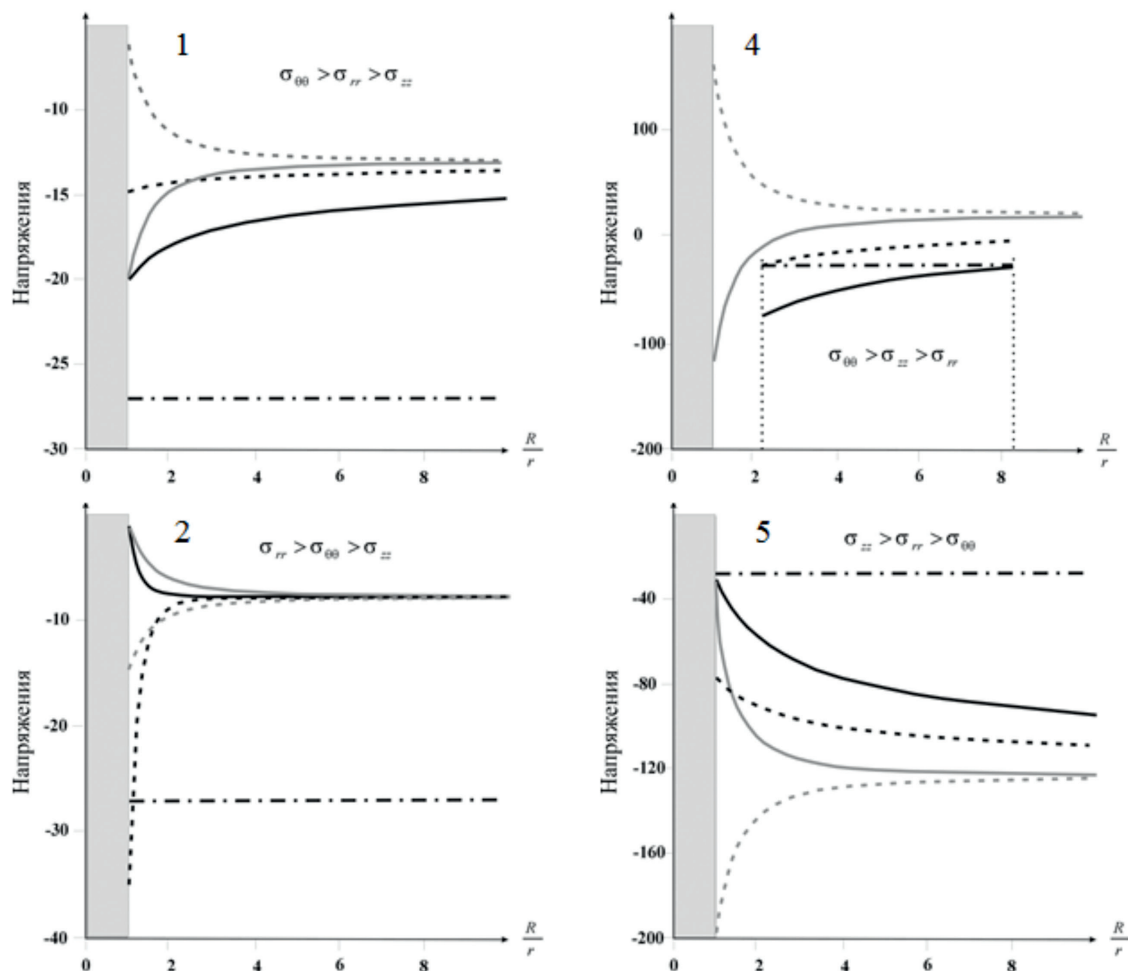


вается сразу от полости, и далее напряженное состояние переходит в состояние  $\sigma_{\theta\theta} > \sigma_{zz} > \sigma_{rr}$ . Таким образом, напряженные состояния (13) и (16) не сохраняются на больших расстояниях от ЦП и поэтому в счете рассматриваемой проблемы дальнего действия влияния аномалии нас не могут заинтересовать.

Первый (11), четвертый (14) и пятый (15) типы напряженных состояний имеют показатель степени ( $D$ ) для радиуса положительные, но меньшие двух (значение показателя степени для упругого решения (2)). Второй тип (12) напряженного состояния положительный и равен 5. Сопоставим эти законы изменения напряжений с изменением уровня напряжений в случае чисто упругого деформирования (2).

На рис. 2 показан характер изменения радиального и тангенциального напряжений по мере удаления от цилиндрического включения четырех из шести вариантов. На этих же рисунках показан также уровень соответствующих напряжений в случае чисто упругого поведения среды. Заметим, что в упругой среде закон затухания возмущения напряжений определяется показателем степени  $D = 2$ .

Как видно, первый, четвертый и пятый варианты напряженных состояний имеют показатель степени  $D$  для радиуса в выражениях для напряжений (10) положительный, но меньший единицы. При принятых в расчетах параметрах прочности, а также  $p_{II}$  и  $p_0$  значение  $D$  было соответственно: 1.25, 0.5, 0.5. Для этих состояний аномальные напряжения, возникающие вблизи ЦП,



**Рис. 2.** Закономерность изменения радиального ( $\sigma_{rr}$  — сплошная линия), тангенциального ( $\sigma_{\theta\theta}$  — пунктирная линия) и вертикального ( $\sigma_{zz}$  — штрих-пунктирная линия) напряжений в слое по мере удаления от цилиндрической полости для четырех из шести типов напряженных состояний: 1 —  $\sigma_{\theta\theta} > \sigma_{rr} > \sigma_{zz}$  (горизонтальное растяжение — жесткое включение  $p_0 = 20$  МПа); 2 —  $\sigma_{rr} > \sigma_{\theta\theta} > \sigma_{zz}$  (горизонтальное растяжение — мягкое включение  $p_0 = 1$  МПа); 4 —  $\sigma_{\theta\theta} > \sigma_{zz} > \sigma_{rr}$  (горизонтальный сдвиг — жесткое включение  $p_0 = 50$  МПа) решение верно в диапазоне радиальных расстояний между двумя вертикальными точечными линиями; 5 —  $\sigma_{zz} > \sigma_{rr} > \sigma_{\theta\theta}$  (горизонтальное сжатие — мягкое включение  $p_0 = 30$  МПа). Линии черного цвета отвечают упругопластическому решению, линии серого цвета — чисто упругому. Вертикальная светло-серая область отвечает расположению полости. По горизонтали откладывается отношение  $R/r$ , а по вертикали — напряжения.

затухают по мере удаления от нее значительно медленнее, чем для идеально упругого поведения среды ( $D=2$ ). Для второго варианта напряженного состояния  $D=5$ . Для этого состояния затухание возмущения по мере удаления от ЦП происходит значительно быстрее, чем для идеально упругой среды.

Для четвертого варианта ограничивающие напряжения соотношения выполняются только в некоторой ограниченной области, выделенной на рис. 2, в двумя вертикальными точечными линиями. Слева от этой области имеет место режим горизонтального сжатия ( $\sigma_{zz} > \sigma_{\theta\theta} > \sigma_{rr}$ ), а справа — режим горизонтального растяжения ( $\sigma_{\theta\theta} > \sigma_{rr} > \sigma_{zz}$ ).

Проведенный анализ показывает, что из рассмотренных шести вариантов напряженных состояний в приложении к проблемам геодинамики могут реализовываться: 1)  $\sigma_{\theta\theta} > \sigma_{rr} > \sigma_{zz}$  (горизонтальное растяжение — жесткое включение), 2)  $\sigma_{rr} > \sigma_{\theta\theta} > \sigma_{zz}$  (горизонтальное растяжение — жесткое включение), 5)  $\sigma_{zz} > \sigma_{rr} > \sigma_{\theta\theta}$  (горизонтальное сжатие — мягкое включение).

Таким образом, из полученных решений следует, что характер изменения напряженного состояния в окрестности включения и возможность дальнего действия его влияния зависят от существующего в массиве геодинамического режима начального напряженного состояния и типа включения (мягкое, жесткое). При этом наиболее быстро затухает влияние мягкого включения для упругопластического решения при начальном состоянии, отвечающем режиму горизонтального растяжения ( $\sigma_{rr} > \sigma_{\theta\theta} > \sigma_{zz}$ ).

Здесь напряжения падают по закону  $(R/r)^5$ .

Следующим по скорости затухания радиального влияния включения является упругое решение, которое не зависит от характера начального состояния. Этому решению отвечает закон снижения влияния включения  $(R/r)^2$ . Для начального состояния горизонтального растяжения, но для жесткого включения упругопластическое решение дает закон радиального уменьшения влияния включения в виде  $(R/r)^{1.25}$ .

Наиболее медленное затухание по закону  $(R/r)^{0.5}$  было получено в упругопластическом решении для жесткого включения при начальном состоянии в виде режима горизонтального сжатия.

Следует сказать, что к областям земной коры, находящимся в закритическом состоянии, в верхней ее части следует относить зоны разломов, а в средней — слои с высоким флюидным давлением (волноводы). Наличие таких областей закритического деформирования, где среда проявляет неупругие свойства (псевдопластические и катакlastические), создает режим дальнего действия влияния формирующихся аномалий напряженного состояния, отличающийся от случая чисто упругой реакции среды. Поскольку зоны разломов имеют определенное направление и находятся в разных геодинамических режимах, то согласно проведенным расчетам дальнего действия влияния аномалии напряженного состояния может быть разным в разных направлениях.

Интерпретацию полученных результатов решения геомеханической задачи можно выполнить в приложении к проблемам вулканологии и физики очага землетрясения. Так, для вулкана высотой в 2 км ( $p_{li} \approx 500$  бар и  $qp_{li} \approx 800$  бар), при размерах подводящего вулканического трубообразного канала в 1 км и при росте давления в нем на 10–15% изменения латеральных упругих деформаций на расстояниях 100 и 1000 км согласно (6) составят соответственно около  $10^{-5}$ ,  $3 \cdot 10^{-6}$  (для режима горизонтального сжатия и при значении модуля Юнга  $7.5 \cdot 10^5$  бар). В случае прогноза подобных деформаций по теории И.П. Добровольского (1991) они будут много меньше:  $10^{-8}$ ,  $10^{-10}$ .

В работе (Латынина и др., 2007) представлены результаты деформографических измерений, выполненных на станциях Баксан (Северо-Западный Кавказ) и Протвино (Подмосковье) в период до и после катастрофического Суматра-Андаманского землетрясения (САЗ). За 20 дней до землетрясения произошло изменение деформаций на  $2 \cdot 10^{-7}$ . Выполним анализ возможности объяснения деформаций, замеренных на указанных станциях, с позиции дальнего действия влияния готовящегося очага катастрофического Суматра-Андаманского землетрясения.

Примем размер области землетрясения, излучившей основную часть сейсмической энергии, за диаметр области включения  $R \approx 200$  км. Предположим, что в период за 20 дней до землетрясения происходило резкое увеличение упругих деформаций сдвига в области, составлявшее 1% ( $\alpha = 0.01$ ) от общей деформации упругого сдвига  $\gamma_0 = 10^{-4}$ . Для модели аномального включения это увеличение деформаций эквивалентно

$\varepsilon_a = \alpha \gamma_0 = 10^{-6}$ . Расстояние от этого участка САЗ до станции Баксан  $R \approx 8000$  км. В этом случае,

согласно модели И.П. Добровольского (1991), изменение деформаций на станции Баксан должны составить  $\delta\varepsilon = \varepsilon_d (R/r)^2 = 6 \cdot 10^{-10}$ . Если использовать подход, предложенный в настоящей статье, и считать, что в коре существуют области закритического состояния, отвечающие модели аномального включения в среде с упругопластическими деформациями в начальном состоянии, то  $\delta\varepsilon = \varepsilon_d \sqrt{R/r} \approx 1.7 \cdot 10^{-7}$ . Как видно, подобранное нами увеличение упругих деформаций ( $\varepsilon_a = 10^{-6}$ ) в области готовящегося очага САЗ хорошо соответствует модели упругопластического деформирования в окрестности включения и не соответствует модели упругого деформирования (по И.П. Добровольскому). Для этой модели деформации в очаге следовало бы увеличить до  $\varepsilon_a = 3 \cdot 10^{-4}$ , что больше начальной упругой деформации  $\gamma_0$ .

## ВЫВОДЫ

Главный вывод, который можно сделать из результатов проведенных исследований, состоит в том, что в среде, находящейся за пределом текучести, затухание возмущающего влияния на напряжения аномального включения происходит медленнее, чем для чисто упругой модели среды. Для начального состояния горизонтального растяжения в случае жесткого включения упругопластическое решение определяет радиальное уменьшение влияния аномалии напряженного состояния в виде  $(R/r)^{1.25}$ . Еще медленнее затухание напряжений по закону,  $(R/r)^{0.5}$ , должно наблюдаться для жесткого включения при начальном состоянии в виде режима горизонтального сжатия. Зависимость градиента напряжений в радиальном направлении от начального геодинамического состояния является вторым главным выводом исследований.

Важно отметить, что рассмотренная в статье задача о влиянии аномалии в виде цилиндрического включения является лишь моделью, необходимой для обоснования принципиального вывода о существенном ее различии с идеальной упругой моделью аномального включения. В рассмотренной нами модели аномалия напряжений вызывает изотропное включение, а область вокруг него однородная и повсеместно находится за пределом текучести. В реальности в верхней части коры присутствуют крупные упругие блоки, а области закритического состояния наблюдаются в относительно узких шовных

зонах — разломах. Вероятно, именно эти шовные зоны следует рассматривать как участки коры, вдоль которых и передается дальнедействующее влияние аномалии напряженного состояния с законами затухания типа (10)–(16). В упругих блоках снижение уровня напряжений отвечает модели упругой среды, рассмотренной в работах (Добровольский, 1991; Dobrovolsky, 2000). Следует также иметь в виду, что достижение предела текучести не всегда означает создание больших пластических деформаций. Необратимые деформации могут быть достаточно малыми, но приводящими к изменению соотношения между напряжениями.

Проведенная интерпретация результатов расчетов для САЗ 2004 г. дает хорошее соответствие деформографическим измерениям (Латынина и др., 2007), выполненным на станциях Баксан (Северо-Западный Кавказ) и Протвино (Подмосковье).

Предлагаемая модель объяснения дальнедействующего влияния аномалий напряженного состояния является альтернативой модели И.П. Добровольского (1991), созданной для идеально упругой коры.

Работа выполнена при поддержке программы РФФИ, грант №16-35-00473 мол\_а.

## Список литературы

- Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 535 с.
- Добровольский И.П. Теория подготовки тектонического землетрясения. М.: Изд-во ИФЗ РАН, 1991. 217 с.
- Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика разломных зон осадочных бассейнов. Автореф. дисс. док. физ.-мат. наук. М.: ИФЗ РАН, 1990. 52 с.
- Кузьмин Ю.О., Чуриков В.А. Механизм формирования аномальных деформационных процессов в период подготовки Камчатского землетрясения 2 марта 1992 г. // Вулканология и сейсмология. 1998. № 6. С. 37–50.
- Латынина Л.А., Милюков В.К., Васильев И.М., Миронов А.П. Максимальные смещения земной поверхности в районе Подмосковья при Суматранском землетрясении 26.12.2004 г. // Геофизика XXI столетия: Сб. тр. 9-х геофизических чтений им. В.В. Федынского. М.: «Герс», 2007. С. 114–120.
- Николаевский В.Н. Граница Мохоровичича как предельная глубина хрупко-дилатансионного состояния горных пород // ДАН. 1979. Т. 249. № 4. С. 817–820.
- Ребецкий Ю.Л. Напряженно-деформированное состояние и механические свойства природных массивов по данным о механизмах очагов землетрясений и структурно-



- кинематическим характеристикам трещин // Автореф. дисс. док. физ.-мат. наук. М.: Изд. ОИФЗ РАН, 2003. 56 с.
- Ребецкий Ю.Л. Механизм генерации тектонических напряжений в областях больших вертикальных движений // Физическая мезомеханика. 2008. Т. 11. № 1. С. 66–73.
- Ребецкий Ю.Л. О возможном механизме генерации в земной коре горизонтальных сжимающих напряжений // ДАН. 2008. Т. 423. № 4. С. 538–542.
- Садовский М.А., Писаренко В.Ф. Зависимость времени проявления предвестника от силы землетрясения // ДАН. 1985. Т. 285. № 6. С. 1359–1361.
- Семинский К.Ж., Кожевников Н.О., Черемных А.В. Межблоковые зоны земной коры: внутренняя структура и геофизические поля: Триггерные эффекты в геосистемах / Под общ. ред. В. В. Адушкина, Г. Г. Кочаряна. М.: ГЕОС, 2010. С. 300–309.
- Стефанов Ю.П. Режимы дилатансии и уплотнения развития деформации в зонах локализованного сдвига // Физическая мезомеханика. 2010. Т. 13. Спец. вып. С. 44–52.
- Хаин В.Е., Ломизе М.Г. Геотектоника с основами геодинамики. М.: МГУ, 2005. 480 с.
- Шерман С.И., Гинтов О.Б., Борняков С.А. и др. Характер разрывообразования в консолидированной земной коре и моделирование зон скалывания // Геофизический журнал. 1988. Т. 10. № 1. С. 13–20.
- Bernard P. Plausibility of long distance electrotelluric precursors to earthquakes // JGR. 1992. V. 97. Iss. B12. P. 17 531–17 596.
- Cowie P.A., Shipton Z.K. Fault tip displacement gradients and process zone dimensions // Journal Structure Geology 1988. V. 20. № 8. P. 983–997.
- Dobrovolsky I.P. Theory of the earthquake prediction. М.: UIPE RSD. 2000. 134 p.
- Hayakawa M., Molchanov O.A. Summary report of NASDA's Earthquake Remote Sensing Frontier Project Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C. 2004. V. 29. Iss. 4–9. P. 617–625.
- Pachell M.A., Evans J.P. Growth, linkage, and termination processes of a 10-km-long strike-slip fault in joined granite: the Gerimi fault zone, Sierra Nevada, California // Journal Structure Geology 2002. V. 24. P. 1903–1924.
- Segall P., Pollard D.D. Mechanics of discontinuous fault // JGR. 1980. V. 85. Iss. D8. P. 4337–4350.

## REGISTRATION OF SUPERCRITICAL CONDITIONS OF GEOLOGIC ENVIRONMENT AND CHALLENGES IN EARTHQUAKE SOURCE REMOTE SENSING

Yu.L. Rebetsky, A.S. Lermontova

*Schmidt Institute of the Physics of Earth RAS, Moscow*

We propose a new concept of evaluation of the areas remote sensing with anomalous mode of stress. It is based on the account of the fact that the earth's crust at its different horizons are vast areas of the supercritical state. Among such areas there are fault zones in the upper crust, and in the middle — layers with a high fluid pressure. The existence of such areas supercritical deformation, wherein the medium exhibits inelastic properties (pseudoplastic), creates a regime of long-range influence of the emerging anomalies stressed state, which differ from the case of purely elastic response of the environment. The paper shows that in two dimensions (horizontal plane layer) reducing disturbance stresses caused by abnormal switching may be determined by law  $1/r^n$  when  $n < 1$  ( $r$  — normalized to enable lateral dimension relative to its length center).

*Keywords: stress, supercritical state, remote sensing, earthquake source, geodynamic regime.*